Vol.11, No.4, Winter 2023, pp.21-42 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI:10.22067/geoeh.2022.74932.1161 Open access

Plain Subsidence Monitoring based on SNAP2STAMPS Automated Algorithm by Radar Interferometry (PSI) Method (Case study: Marand Plain)

Shahram Roostaei[a], Samira Najafvand[b*]

[a] *Professor in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran*
[b] *PhD Candidate in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran*

Received: 24 January 2022 ***Revised: 15 February 2022*** ***Accepted: 15 March 2022***

Abstract

Global climate changes and population growth have increased the need to exploit underground water resources. The phenomenon of land subsidence as a result of groundwater extraction and water depletion is one of the environmental hazards that threatens societies all over the world. In this research, for the first time, Sentinel-1 radar satellite images were used by the SNAP2StaMPS to automate the process of processing and analyzing the subsidence in Marand Plain. In recent years, the uneven development of agricultural lands and the excessive extraction of underground water in the Marand plain in East Azerbaijan province have caused landslides on the surface of this plain. In this study, an automatic interferometric processing algorithm between SNAP and StaMPS was used to determine the displacement rate in the direction of the satellite line of sight. The results of the PSI interferometry technique were performed on 133 images of the Sentinel-1 satellite in the descending orbit of the Sentinel-1 satellite. Based on the obtained results, the annual land displacement rate for Marand plain in 2016, 2017, 2018, 2019, and 2020 was -13.7, -12, -2.15, -12.3 and -13.1 cm respectively. In order to validate the results, the amount of subsidence resulting from the interferometric processing was compared with the amount of groundwater level drop in the study area, using the unit hydrograph analysis method. The results showed that the amount of water level drop and the results of hydrograph analysis of observation wells in the region are consistent with the results of time series maps obtained from interferometry. Therefore, the automatic method presented in this study can be used for monitoring land subsidence.

Keywords: Land Subsidence, Radar Interferometry (PSI), Marand Plain, Snap2stamps Automated Algorithm

---

*. Corresponding author: Samira Najafvand E-mail: samira.najafvand@tabrizu.ac.ir Tel: + 989387607669

How to cite this Article: Roostaei, S., & Najafvand, S. (2023) Plain Subsidence Monitoring based on SNAP2STAMPS Automated Algorithm by Radar Interferometry (PSI) Method (Case study: Marand Plain).*Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 21-42.
DOI:10.22067/geoeh.2022.74932.1161

Geography and Environmental Hazards
Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023
https://geoeh.um.ac.ir
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74932.1161

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارهٔ چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۴۲-۲۱
مقاله پژوهشی
ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

پایش پدیده فرونشست دشت‌ها بر مبنای الگوریتم خودکار SNAP2STAMPS به روش تداخل سنجی راداری (PSI) (مطالعه موردی: دشت مرند)

شهرام روستایی- استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
سمیرا نجف وند[1]- دانشجوی دکتری رشته ژئومورفولوژی گرایش برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۶ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

چکیده

در این تحقیق برای اولین بار به‌منظور خودکار سازی فرآیند پردازش و تحلیل فرونشست دشت مرند از تصاویر ماهواره‌ای راداری سنتینل-۱ توسط پکیج SNAP2StaMPS استفاده‌شده است. در سال‌های اخیر توسعه ناهمگون اراضی کشاورزی و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی دشت مرند در استان آذربایجان شرقی موجب بروز پدید فرونشست زمین در سطح این دشت شده است. لوله زایی میله چاه‌های منطقه، شکاف‌های افقی در سطح این دشت، حکایت از رخداد فرونشست سطح زمین دارد. در این تحقیق برای تعیین نرخ جابجایی در جهت خط دید ماهواره، از الگوریتم پردازشی تداخل سنجی خودکار بین نرم‌افزار SNAPوStaMPS استفاده شد. نتایج فن تداخل سنجی PSI بروی ۱۳۳ تصویر سنتینل-۱ در مدار Descending ماهواره Sentinel-1، حاکی از نرخ جابجایی سالانه زمین برای دشت مرند از سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ به ترتیب ۱۳/۷-، ۱۲-، ۱۵/۲-،۱۲/۳- و ۱۳/۱ سانتی‌متر دارد. جهت صحت سنجی نتایج، مقایسه میزان فرونشست حاصل از پردازش تداخل سنجی با میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی در محدوده مطالعاتی از طریق روش تحلیل هیدروگراف واحد انجام

---

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۳۸۷۶۰۷۶۶۹ Email: Samira.najafvand@tabrizu.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

روستایی، شهرام؛ نجف‌وند، سمیرا؛ ۱۴۰۱. پایش پدیده فرونشست دشت‌ها بر مبنای الگوریتم خودکار SNAP2STAMPS به روش تداخل سنجی راداری (PSI) (مطالعه موردی: دشت مرند). جغرافیا و مخاطرات محیطی.۱۱(۴)،. صص ۴۲-۲۱
https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74932.1161

شد. نتایج نشان می‌دهد که میزان افت سطح آب و نتایج حاصل از تحلیل هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای منطقه، با نتایج حاصل نقشه‌های سری زمانی حاصل از تداخل سنجی تطابق دارند؛ بنابراین، از روش خودکار ارائه‌شده در این پژوهش می‌توان جهت پایش فرونشست زمین استفاده کرد.
کلیدواژه‌ها: فرونشست زمین، روش تداخل سنجی راداری (PSI)، دشت مرند، الگوریتم خودکار snap2stamps.

۱- مقدمه

مخاطره فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است. این پدیده به یکی از مسائل و مشکلات اساسی جوامع بشری به دلیل خسارات جبران‌ناپذیر نسبت به دیگر مخاطرات تبدیل‌شده است. شکل‌گیری این پدیده به‌صورت آرام در طی مدت‌زمان طولانی اتفاق می‌افتد و فاقد برگشت‌پذیری است. فرونشست به‌طورکلی ناشی از دلایلی همچون انحلال تشکیلات زیرسطحی، تراکم رسوبات در اثر استخراج سیالات و ذخایر زیرزمینی، بارگذاری، زهکشی و یا ارتعاش، تراکم هیدرولیکی، ناپایداری خاک‌ها در سطوح شیب‌دار، انقباض خاک‌های رسی، ذوب یخ لایه‌های منجمد در اعماق زمین و ... پدیدار می‌شود. فرورفتگی قیفی شکل زمین، پس‌روی آب دریا، ریزش سطح و جابجایی پوسته‌ای زمین از علائم آن است. علاوه بر این، فرونشست زمین در مناطق شهری می‌تواند باعث فروریختن فونداسیون، تخریب خط لوله زیرزمینی و آسیب جاده شود. این مخاطره، موجب تغییرات توپوگرافیکی سطح زمین نیز می‌شود که در اکثر اوقات آسیب‌های جبران‌ناپذیری به بار می‌آورد.

علل وقوع فرونشست زمین در نقاط مختلف دنیا به دلایل مختلفی رخ می‌دهد، ازجمله، احیای مناطق ساحلی، توسعه فعالیت‌های صنعتی و ساخت‌وسازهای شهری در مناطق دلتایی و استخراج بی‌حد آب‌های زیرزمینی در جلگه‌ها، که جابجایی سطح زمین را به دنبال دارد. در سراسر جهان، دشت‌های ساحلی و مناطق دلتایی رودخانه‌ای بیشترین فرونشست زمین رادارند (هررا گارسیا[1] و همکاران،۲۰۲۱).

محرکان اصلی فرونشست به دو عامل انسانی و طبیعی تقسیم می‌شوند، عوامل ناشی از فعالیت‌های انسانی شامل استخراج سیالات از لایه‌های زیرسطحی (مانند آب، نفت و گاز)، تغییر کاربری زمین (به‌عنوان‌مثال بارگذاری ناشی از ساختمان‌های ساخت بشر)، ساخت تأسیسات زیرزمینی و معدنکاری و فعالیت‌های طبیعی شامل گسل، حرکات زمین ساختی، تثبیت و فشردگی رسوبات، فروریزش لس، افزایش سطح آب دریا، اکسیداسیون و زهکشی خاک‌های آلی، فرسایش کارستی و فروافتادگی ناشی از پرمافرست هستند (کروستو[2] و همکاران،۲۰۱۶). در این میان، عامل انسانی با ۷۶/۹۲ درصد از کل علل فرونشست در سراسر جهان و استخراج آب‌های زیرزمینی ۵۹/۷۵ درصد از دلایل

1 Herrera-García
2 Crosetto

اصـلی فرونشـسـت در سـراسـر جهان به شـمار می‌روند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۹). تقاضای روزافزون منابع آب زیرزمینی، به دلیل توسـعه شـهری و کشـاورزی، محرک‌های اصـلی فرونشـسـت زمین، به‌ویژه در مناطق خشـک و نیمه‌خشک هستند (باقری گاو کش[1] و همکاران، ۲۰۲۱).

امروزه فرونشـسـت زمین یک مخاطره جهانی ناشـی از عامل انسـانی و طبیعی اسـت و بیشـترین مقدار میانگین فرونشـسـت سـالانه (LSavg) در شـرق چین، دشـت مرند در شـمال غرب ایران، سـاحل خلیج تگزاس در جنوب ایالات‌متحده، جاکارتای شـمالی در اندونزی، منطقه شهری مکزیکوسیتی در مرکز مکزیک مشاهده‌شده است؛ بنابراین پیش‌بینی، تشخیص و کاهش فرونشست زمین در دشت‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (هررا گارسیا و همکاران، ۲۰۲۱).

در مطالعه حاضـر جهت پایش فرونشـسـت زمین در دشـت مرند در اسـتان آذربایجان شـرقی از روش پراکنش گرهای دائمی (PSI) که برای اولین بار توسط فرتی[2] و همکاران در سال ۲۰۰۱ مطرح شد، استفاده‌شده است (فرتی و همکاران، ۲۰۰۱). این تکنیک مزایای زیادی دارد، مانند پوشـش مکانی وسـیع، حسـاسـیت زیاد به تغییر شـکل‌های کوچک و عملکرد در روز و شـب و تمام شـرایط آب و هوایی را ارائه می‌دهد، که این مزایا پایش دقیق فرونشـست زمین را تضـمین می‌کند. دقت بالای روش تداخل سنجی راداری PSI، سبب شده است تا در بسیاری از تحقیقات از این روش به‌منظور برآورد میزان فرونشست استفاده شود.

در ایران نیز بحث فرونشـست زمین به یک بحران ملی تبدیل‌شده که در بیشتر موارد ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی اسـت. در این خصـوص پژوهشـگران مختلفی میزان فرونشـست زمین را در مناطق مختلف ایران انجام‌شده است.

خرمی (۱۳۹٦)، در فاصله زمانی سال ۲۰۱٤ تا ۲۰۱۷ میلادی با استفاده از ٦۹ تصویر راداری مدارهای بالا گذر و پایین‌گذر ماهواره سـنتینل–۱، بیش‌ترین مقدار فرونشست را در شمال غرب مشهد و در حدود ۱٤ سانتی‌متر در سال به دسـت آورده است. مؤمنی (۱۳۹۷)، نرخ فرونشـسـت را در دشت کبودآهنگ–فامنین همدان را در بازه‌های زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸، با روش پراکنش گرهای دائمی، به ترتیب ۹۲– و ۹۸– میلی‌متر در سـال محاسـبه کرده است. فروغ نیا و همکاران (۱۳۹۷)، با به‌کارگیری تصاویر سنجنده های انویست و ستینل–۱ نرخ فرونشست را از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱٦ حدود ۱۳۰ میلی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. شرافت و همکاران (۱۳۹۸)، در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ با اسـتفاده از ۱۲ تصـاویر ماهواره‌ای Envisat، متوسـط سـرعت فرونشـست در دشت ابرکوه یزد را ۲ تا ۳ سانتی‌متر و در منطقه مهردشت ۵ سانتی‌متر به دست آورده‌اند.

---
1 Bagheri-Gavkosh
2 Ferretti

احمدی و همکاران (۱۳۹۹)، نرخ فرونشــســت دشــت اســدآباد همدان را ۲۲۶- ۲٦٦ میلی‌متر در سال به دست آورده اســت. همچنین با توجه به نتایج حاصل از تحقیق نرخ فرونشست از مناطق شهری به سمت دشت‌های اطراف صـعودی بوده اسـت. پاپی و همکاران (۱۳۹۹)، به تحلیل سـری زمانی فرونشست در غرب تهران (دشت شهریار) و ارتباط آن با برداشــت آب‌های زیرزمینی با تکنیک تداخل سنجی راداری پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق بیانگر پیوستگی رخداد فرونشــســت در زمین‌های کشاورزی با نرخ متوسط ۹۰- سانتی‌متر و حداکثر ۲۳- سانتی‌متر در سال در منطقه دشـتی نشـان می‌دهد، که افت ۰/۵ تا ۱/۵ متری سطح آب در آبخوان علت آن است. خوش‌لهجه آذر (۱۳۹۹)، میزان جابجایی بخشـی از دشت‌های کبودرآهنگ- فامنین و همچنین رفتار زمین قبل از رخداد فرو چاله در کردآباد همدان را با دو روش PSI و SBAS به ترتیب ۵/۷۱ سـانتی‌متر و ۲٤/٦ سـانتی‌متر در سـال به دست آورده است. قره چلو و همکاران (١٤٠٠)، با اسـتفاده از تصـاویر راداری آلوس (ALOS) و سـنتینل-۱ میزان فرونشـست سالانه را در دشت مشـهد بررسـی کرده‌اند. نتایج حاصل از فرآیند تداخل‌سنجی راداری برای ماهواره آلوس در این تحقیق، بیانگر مقدار فرونشــست ۲/۵ تا ۸/۳ و ۷/٤ سانتی متر برای تصاویر ALOS و برای ماهواره سنتینل-۱ بین ۱/١٦ تا ٤/١٧ سانتی‌متر و ۳/۲۰ سانتی‌متر در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ بوده است که نشـــان‌دهنده روند افزایش پدیده فرونشست در منطقه بوده است.

ماتئوس[1] و همکاران (۲۰۱۷)، فرونشست زمین در آبخوانی در اسپانیا را با استفاده از داده‌های راداری انویست در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹، و ماهواره (COSMO-SkyMed)، بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱٤ و تصاویر سنجنده سنتینل- ۱ بین سـال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱٦. مقدار فرونشست را ۵۵ میلی‌متر به دست آورده‌اند. آن‌ها بیش‌ترین میزان فرونشست زمین مربوط به یک دوره طولانی و خشک در منطقه بوده که بر روی زمین‌های رسی رخداده است. سان[2] و همکاران (۲۰۱۷)، طی پژوهشی فرونشـست زمین در بخش‌های جنوبی پایین‌دست دشت لیائوهه[3] چین بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ با اسـتفاده از روش تداخل سـنجی پراکنده ساز دائمی (PSI) پرداخته‌اند. تصاویر مورد پردازش در این تحقیق، تصـاویر راداری مربوط به ماهواره L باند آلوس پالسـار بوده که از طریق نرم‌افزار استمپس (StaMPS) مورد پردازش قرارگرفته‌اند؛ و فرونشــســت ســالانه زمین را در این دشت به دست آورده‌اند و نقشه‌های سری زمانی برای سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ ایجاد کرده‌اند. در کل، بر اساس نتایج روش پراکنده سازهای دائمی، سه ناحیه فرونشست در زیرزمین کشف شد، و این مناطق در مناطق نفتی، مناطق استخراج نمک و مناطق ساحلی قرار داشتند. میزان فرونشست زمین از ۵۰ میلی‌متر در سـال به ۲۳٦ میلی‌متر در سال رسیده است، مقصودی و همکاران (۲۰۱۸)، نرخ فرونشست جاوا در غرب اندونزی را در دو بازهٔ زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ و ۲۰۱۵ تا ۲۰۱٦ را طبق داده‌های سنتینل-۱ و آلوس به ترتیب ٤/٦

1 Rosa María Mateos
2 Sun
3 Liaohe Plain

و ۲/۸ میلی‌متر در سال برای این منطقه گزارش کرده است. لیوسیس[1] و همکاران (۲۰۱۸)، فرونشست در نواحی روستایی الویگان[2] امارات را بین سال‌های ۲۰۰۳–۲۰۱۰ به ترتیب برای داده‌های آلوس و سنتینل–۱ حدود ۱۸ سانتی‌متر و حدود ۱۰ سانتی‌متر در سال به دست آوردند. دالیو[3] و همکاران (۲۰۱۸)، فرونشست زمین را در باتلاق‌های نمکی لاگونی ونیز با استفاده تداخل سنجی راداری و تحقیقات زمینی را موردبررسی قرار داده‌اند. این محققین از تکنیک پراکنده ساز دائمی (PSI)، داده‌های راداری در یک دوره ۵ ساله مربوط به منطقه موردمطالعه استفاده کرده‌اند. نرخ فرونشست را بیش از ۲۰ میلی‌متر در سال به دست آورده‌اند. عامل اصلی فرونشست، عامل انسانی بوده است. میلر[4] و همکار (۲۰۱۹)، در مقاله‌ای به بررسی فرونشست زمین در هوستون و ارتباط آن با سیل حاصل از طوفان هاروی پرداخته‌اند. این محققین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تصاویر سنجنده سنتینل–۱، سری B، نقشه پهنه‌های خطر سیلاب را مشخص کرده‌اند. نقشه فرونشست زمین را نیز قبل از وقوع طوفان را با استفاده از پردازش داده‌های چند زمانه SAR ماهواره‌ای پیشرفته (ALOS) و ماهواره‌های سنتینل–۱، سری B، به دست آورده‌اند. آن‌ها دریافتند که مقدار فرونشست بالای ٤۹ میلی‌متر در سال و ۳٤ میلی‌متر در سال در طی بازه زمانی پردازش تصاویر آلوس (ژوئیه ۲۰۰۷–ژانویه ۲۰۱۱) و سنتینل–۱ سری B، (دسامبر ۲۰۱۵ تا اوت ۲۰۱۷) بوده است، و نتیجه گرفتند که ۸۵ درصد از منطقه سیل‌زده با نرخ کمتر از ۵ میلی‌متر در سال فرومی‌نشیند. آن‌ها از طریق آزمون کای اسکوتر مستقل[5] بیان نمودند که فرونشست زمین از طریق تغییر پایه ارتفاع سیلاب[6] و گرادیان‌های شیب‌بر روی شدت سیل تأثیرگذار بوده است. حقیقی و معتق (۲۰۱۹)، فرونشست دشت تهران و ورامین را مطالعه کردند. آن‌ها مطالعه جامعی را برای بررسی دقیق پدیده فرونشست به کمک روش InSAR و پردازش ۳۹ تصویر ماهواره انویست و ۱۰ تصویر ماهواره آلوس پالسار (ALOS-PALSAR) و ٤۸ تصویر ماهواره تراسار–ایکس (TerrASAR-X) و ٦٤ تصویر ماهواره سنتینل–۱ برای یک بازه زمانی ١٤ ساله به کمک ٤۰۰ اینترفروگرام انجام داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که دشت تهران با ماکزیمم نرخ فرونشست ۲۵ سانتی‌متر در حال فرونشست است و فرودگاه بین‌المللی تهران سالانه ۵ سانتی‌متر فرومی‌نشیند. ژئو[7] و همکاران (۲۰۱۹)، در مقاله‌ای به ارزیابی سری‌های زمانی الگوهای فرونشست زمین در دشت پکن شرقی، چین پرداخته‌اند. این محققین نخست، به روش تداخل سنجی پراکنش گر دائمی (PSI)، و با به‌کارگیری داده‌های سنجنده انویست و رادارست (Radarsat-2) در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵، برای جابجایی‌های درازمدت این دشت استفاده گردیده است. نتایج این تحقیقی ماکزیمم نرخ فرونشست را، ۱/۱۸٤ میلی‌متر در سال تا

1 Nikolaos Liosis
2 Al Wagan
3 Cristina Da Lio
4 Miller
5 The Chi-square Test of Independence
6 Base Flood Elevations
7 Junjie Zuo

سـال ۲۰۱۵ به دست آوردند. دلیل عمده الگوهای تکاملی سری زمانی فرونشست، تغییرات سالانه تراز آب زیرزمینی بوده است.

سیان[1] و همکاران (۲۰۱۹)، فرونشست زمین در شهرهای ساحلی بانجول[2] (گامبیا) و لاگوس[3] (نیجریه) در آفریقا را با استفاده از تداخل سنجی پراکنش گرهای دائمی (PSI) و تصاویر سنتینل-۱، و تصاویر (TerraSAR-X)و تصاویر (COSMO-SkyMed) با بهره‌گیری از پکیج خودکار (SNAP2STAMPS)، را مورد مطالعه قرار داده‌اند. این روش خودکار برای مناطق با جابجایی زیاد زمین، اطلاعات مفید برای توسـعه شـهری، مدیریت خطر بلایا و برنامه‌ریزی سـازگاری با آب‌وهوا را ارائه می‌دهد. فیاسـچی[4] و همکاران (۲۰۱۹)، جابجایی زمین را با اسـتفاده از روش پراکنش گرهای دائمی (PSI)، در مناطق معتدل اقیانوسـی با به‌کارگیری داده‌های راداری سنتینل-۱، در جمهوری ایرلند مطالعه کرده‌اند. بازه زمانی این مطالعه از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ بوده است. بیشترین مقدار جابجایی زمین حاصل از فرونشست را ۱۷- میلی‌متر در سـال در منـاطق شـهری و محیط‌هـای طبیعی رخ‌داده اسـت. ال کمالی[5] و همکاران (۲۰۲۱)، فرونشست و جابجایی زمین را در منطقه ریماه، امارات متحده عربی به‌عنوان یک منطقه با آب‌وهوای خشک و بیابانی بررسـی کرده‌اند. سـرعت فرونشـست در این محدوده را ٤۰ میلی‌متر در سال به دست آورده‌اند که به علت افت ۱۲ متری سطح آب‌های زیرزمینی در این منطقه بوده است. در این تحقیق، از روش تداخل سنجی پراکنش گرهای پایدار (PS-InSAR) بر مبنای پردازش خودکار SNAP2STAMPS برای برآورد فرونشست در دشت مرند استفاده شد.

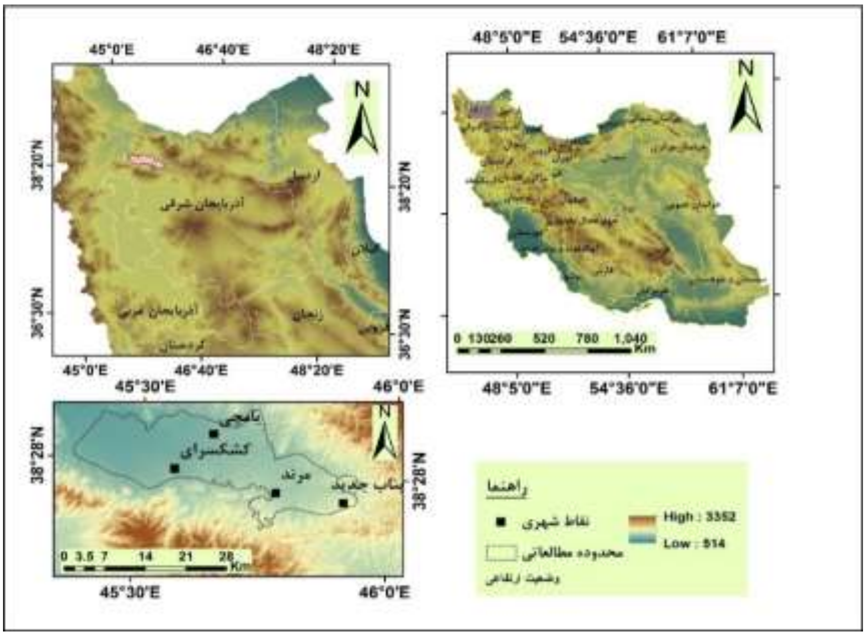
دشـت مرند، یکی از دشـت‌های مهم اسـتان آذربایجان شـرقی اسـت که به دلیل بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی جهت تأمین نیازهای آبی منطقه خصـوصـاً کشـاورزی و همچنین کاهش نزولات جوی و خشک‌سالی‌های اخیر دچار فرونشـست شده است. سطح آب‌های زیرزمینی در این دشت از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷، به‌طور متوسط تا ۳ متر در سـال برآورد شـده اسـت، که زمین‌های کشـاورزی حاشیه کوشـک سرای و یامچی بالاترین نرخ افت سطح ایسـتابی را داشـته‌اند (داداشی و همکاران، ۱۳۹۹: ۹۲). لذا با توجه به اهمیت این موضوع، تحقیق حاضر با استفاده از ۱۳٤ تصـویر ماهواره سـنتینل-۱ (Sentinel-1A) برای به دست آوردن نرخ فرونشست زمین در محدوده مطالعاتی از سال ۲۰۱٦ تا ۲۰۲۰ انجام‌گرفته است که نتایج آن می‌تواند در مدیریت آبخوان این دشت مؤثر واقع شود.

1 Cian
2 Banjul
3 Lagos
4 Simone Fiaschi
5 Muhagir El Kamali

۲- مواد و روش

۲-۱- موقعیت منطقه موردمطالعه

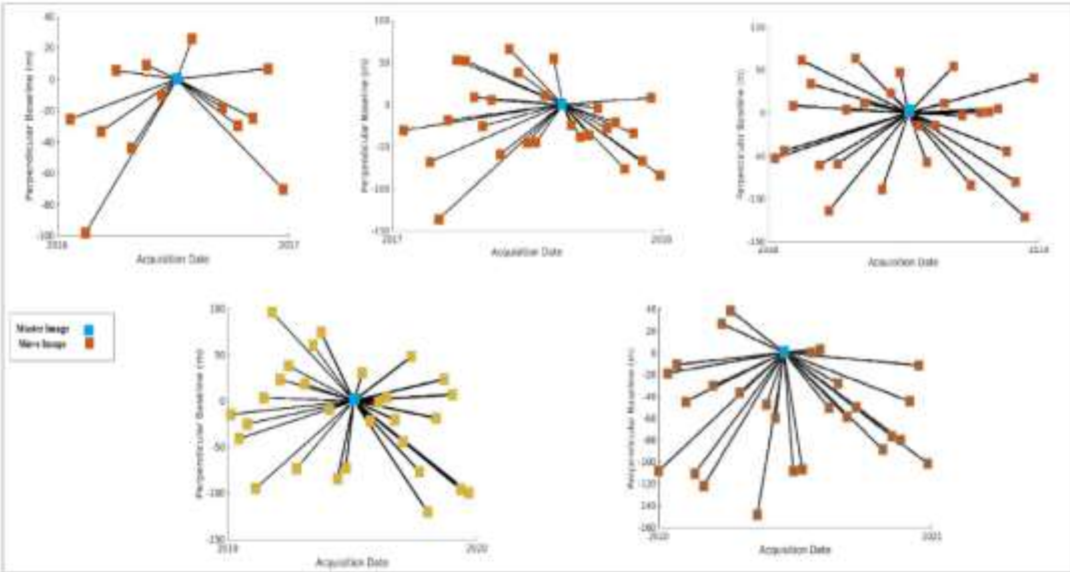
دشت مرند به‌عنوان بخشی از حوضه آبریز رودخانه ارس در شمال غرب ایران واقع‌شده است و ازنظر زمین ساختی به‌صورت یک گرابن – در حدفاصل رشته‌های کوهستانی قره داغ در شمال و میشوداغ در جنوب – فروافتاده است. گسل‌های متعددی به‌ویژه گسل شمالی میشو در شکل‌گیری این دشت نقش داشته‌اند. این دشت با روند شرقی–غربی، به‌صورت یک چاله ساختمانی نئوژن–کواترنری در شمال غرب ایران و حدفاصل دو رشته‌کوه عمده منطقه یعنی قره داغ و میشو داغ واقع‌شده است. این چاله انباشته از نهشته‌های آبرفتی دوران کواترنری است که در قالب مخروط افکنه هایی در امتداد جبهۀ کوهستانی مشرف به دشت ردیف شده‌اند (مختاری کشکی، ۱۳۸٦). قدیمی‌ترین واحد زمین‌شناسی منطقه، متعلق به پرکامبرین است که در جنوب دشت در مجاورت توده‌های نفوذی گرانیت شیل و گرانیت قوشچی از گسترش محدودی برخوردار است. دو رودخانه اصلی این زیر حوضه؛ زیلبر چای و زنوز چای است که پس از اتصال به رودخانه قطور چای و سپس ارس، به حوضه آبریز دریای خزر می‌ریزند. سلسله جبال جنوبی شامل ارتفاعات میشو و مورو هستند که حد بین حوضه‌های آبریز دشت مرند یکی از دشت‌های با توان بالا درزمینه تولید محصولات باغی است. این دشت بهره‌مندی مناسبی از منابع آبی داشته و این امر، به رونق کشاورزی آن کمک نموده است، اما با توجه به مشکلاتی نظیر کم‌آبی و نیاز به افزایش تولید با توجه به افزایش جمعیت، مکانیزه شدن سیستم آبیاری، کاشت و برداشت محصولات در دشت مرند، در سال‌های اخیر دچار فرونشست شده است. برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی طی سنوات گذشته موجب کاهش ذخایر آبی و ایجاد مشکلات جدی ازجمله کاهش آبدهی چاه‌ها، خشک شدن قنوات و چشمه‌ها، شور شدن آب‌های زیرزمینی در بخش‌های زیادی از دشت مرند شده است. برداشت بیش‌ازحد آب و افت سطح آب زیرزمینی موجب ایجاد فروچاله و یا فرونشست زمین در این دشت شده است. فرونشست رخ‌داده در دشت مرند باعث شده در منطقه بر زیرساخت‌های موجود تأثیر گذاشته و باعث شکست پایه بتنی چاه‌های کشاورزی و خم شدن تیرهای برق گردیده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده موردمطالعه، دشت مرند

۲-۲- روش انجام پژوهش

در تکنیک پراکنش گرهای دائمی (PsInSAR) ایده اصلی شناسایی نقاط همبسته با رفتاری ثابت و پایدار در طول زمان با استفاده از سیگنال استخراج‌شده از داده‌های راداری است. درواقع بر روی هر پراکنش گر دائمی اطلاعاتی از قبیل نرخ سرعت جابجایی و خطای باقیمانده مدل ارتفاعی رقومی زمین برآورد می‌شود روند کلی تکنیک پراکنش گرهای دائمی در شکل ۳ ارائه شده است. در مطالعه حاضر به‌منظور بررسی رفتار فرونشست در منطقه مطالعاتی، از پکیج StaMPS-PSI استفاده شده است (هوپر، ۲۰۱۸). تغییرات و افت سطح آب در طول ۱۸ سال، از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ با استفاده از داده‌های چاه‌های پیزومتری، از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی دریافت و در سطح دشت بررسی و سطح آب در ۲۳ گمانه که داده‌های کامل و مشترک داشته‌اند در یک فایل اکسل تهیه گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS روش درون‌یابی (IDW) انجام شد. از روش پراکنده ساز دائمی (PSI) بر مبنای پردازش خودکار SNAP2STAMPS به‌منظور پایش فرونشست منطقه استفاده‌شده است. جهت پردازش از تصاویر ماهواره سنتینل-۱ مربوط به بازه زمانی ۵ ساله از تاریخ ۲۳ ژانویه ۲۰۱۶ تا ۲۲ دسامبر ۲۰۲۰ استفاده‌شده است. تعداد این تصاویر ۱۳۳ تصویر سنتینل-۱، از نوع SLC با قطبش (VV) و حالت (IW) و پایین گذر (مسیر ۷۹) بوده است. بیس لاین زمانی هر تصویر، ۱۲ روز بوده است. به حداقل رساندن این بیس لاین به همدوسی داده‌ها می‌انجامد. شبکه گراف مربوط به تصاویر سنتینل-۱ هر پنج پارت تحقیق ترسیم شده است، گراف مورداستفاده در این پردازش به روش ستاره‌ای است (شکل ۲).



شکل ۲-گراف ستاره‌ای اینترفروگرام های ایجادشده هرسال برای روش تداخل سنجی راداری (PSI)

در شـکل ۲، نگاره‌های بیس لاین را برای هر پنج دوره موردبررسـی در تحقیق را نشـان می‌دهد. تصـویر پایه در مرکز و به رنگ قرمز که بیشـینه مقدار همبسـتگی زمانی، مکانی و نرخ داپلر را با سایر تصاویر دارد، و موقعیت نسبی تصـاویر پیرو را به رنگ آبی نشـان داده است. هر خط مخفف یک جفت تصویر است که برای محاسبه اینترفروگرام مورداستفاده قرار می‌گیرد. پردازش‌های لازم در نرم‌افزار اسنپ (SNAP) و استمپس (STAMPS) انجام گرفته است و اینترفروگرام‌های لازم تهیه‌شده و درنهایت با استفاده از روش پراکنده ساز دائمی، میزان فرونشست به‌دست‌آمده است. مشخصات تصاویر انتخابی مورداستفاده در تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است:

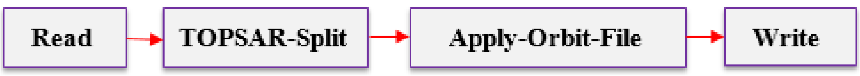
جدول ۱- مشخصات کلی تصاویر انتخابی مورد استفاده در تحقیق

N-images	Fram	Orbit	Pass	Last image	First image	Satellite sensors
١٤	٤٦٤	Descending	٧٩	٢٠١٦/١٢/٢٣	٢٠١٦/٠١/٢٣	Sentinel-1A
٢٨	٤٦٤	Descending	٧٩	٢٠١٧/١٢/٣٠	٢٠١٧/٠١/١٦	Sentinel-1A
٣٠	٤٦٤	Descending	٧٩	٢٠١٨/١٢/٢٥	٢٠١٨/٠١/١١	Sentinel-1A
٣٠	٤٦٤	Descending	٧٩	٢٠١٩/١٢/٢٠	٢٠١٩/٠١/٠٦	Sentinel-1A
٣١	٤٦٤	Descending	٧٩	٢٠٢٠/١٢/٢٥	٢٠٢٠/٠١/٠١	Sentinel-1A

پردازش داده‌ها به روش پراکنده ساز دائمی در این تحقیق به دو بخش زیر تقسیم‌شده است که عبارت‌اند از:

پردازش خودکار با استفاده از یک تصویر پایه با اسکریپت‌های بسته متن باز پایتون نرم افزار اسنپ[1]

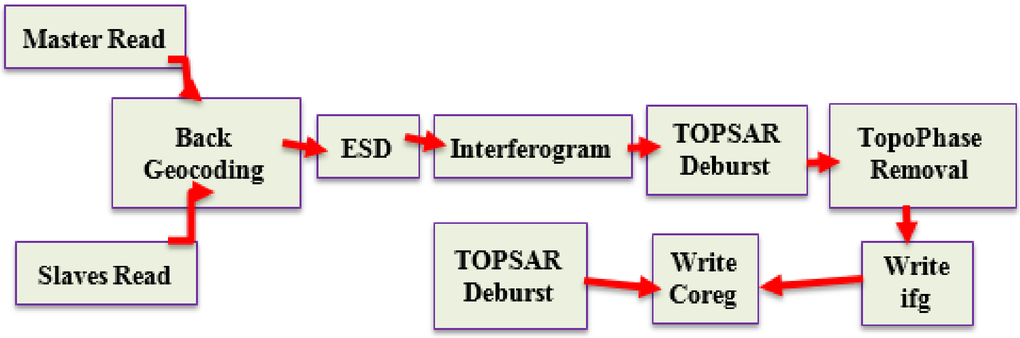
پکیج منبع باز SNAP2STAMPS، توسط ژوزه مانوئل دلگادو بلاسکو[2] و میشائیل فیوملس[3] در سال ۲۰۱۸ ارائه‌شده است (دلگادو بلاسکو و همکاران، ۲۰۱۹). در این تحقیق آخرین ورژن این پکیج که توسط دلگادو بلاسکو در سال ۲۰۱۹ ارتقاء یافت استفاده‌شده است (دلگادو بلاسکو و همکاران، ۲۰۱۹). برنامهٔ پردازش خودکار SNAP2STAMPS، طی چهار مرحله انجام می‌پذیرد. در این نوع پردازش، اسکریپت‌ها به‌طور سامانمند با استفاده از ابزار گراف، مجموعه‌ای از اینترفروگرام را به حالت دسته‌ای[4] ایجاد می‌کنند. قبل از آن تصاویر پایه هر دوره انتخاب می‌شوند، انتخاب تصویر Master به صورتی انجام می‌شود که در آن تأثیر عدم همبستگی‌های مکانی – زمانی و اختلاف داپلر مرکزی به حداقل برسد. آماده‌سازی و مرتب کردن تصاویر سنتینل-۱ بر اساس تاریخ اخذ تصاویر انجام خواهند شد. بعدازاینکه تصویر Master برای هر دوره انتخاب گردید، تمامی تصاویر Slave بر اساس مختصات محدوده موردمطالعه برش داده‌شده و اطلاعات مداری آن‌ها به‌طور خودکار توسط SNAP بارگیری و به‌روزرسانی می‌شوند (شکل ۳).



شکل ۳-گراف مربوط به مرحله جداسازی تصاویر و دریافت اطلاعات مداری آن‌ها در بسته متن باز پایتون نرم افزار اسنپ

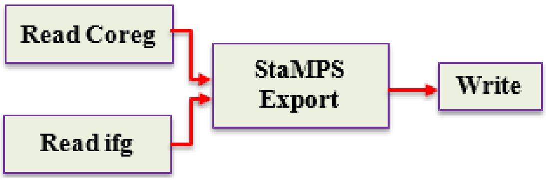
ثبت هندسی تصاویر لازمه تشکیل اینترفروگرام در مرحله بعدی است که تضمین می‌کند هر تارگت زمینی مربوط به یک پیکسل مشابه با مختصات آزیموت و رنج یکسان در هر دو تصویر پایه و پیرو است. مرحله بعدی، ثبت هندسی داده‌ها و تولید اینترفروگرام ها است که با استفاده از تنوع طبقی آن‌ها صورت می‌گیرد (دلگادو بلاسکو و همکاران، ۲۰۱۹). این مرحله به لحاظ محاسباتی، دشوارترین مرحله پردازش در SNAP2STAMPS است، زیرا ثبت هندسی داده‌های تاپسار را انجام می‌دهد و هم‌زمان با تولید اینترفروگرام ها، مقدار سهم فایز نویز و فاز زمین مسطح نیز حذف‌شده و بخش‌های جداشدهٔ تصاویر نیز به همدیگر متصل می‌شوند (شکل ٤).

1 SNAP2STAMPS
2 Delgado Blasco
3 Michael Foumelis
4 Batch mode



شکل ٤- گراف مربوط مرحله ثبت هندسی و تولید اینترفروگرام ها در بسته متن‌باز پایتون نرم‌افزار اسنپ

داده‌های تکمیلی موردنیاز استمپس ازجمله؛ باند ارتفاعی و مختصات عرض و طول جغرافیایی داده‌ها نیز تولید می‌شوند. درنهایت خروجی‌های استمپس آماده‌سازی می‌شوند، که داده‌های پردازش‌شده مراحل قبلی را به فرمت رستری باینری و سازگار با استمپس تبدیل می‌کند (شکل ٥).



شکل ٥-گراف مربوط مرحله خروجی گرفتن در بسته متن‌باز پایتون نرم‌افزار اسنپ

یکی از کاربردی‌ترین شاخص‌های شناسایی پیکسل‌های پراکنده ساز دائمی، شاخص پراکندگی دامنه هست که برای اولین بار توسط فرتی[1] و همکاران در سال ۲۰۰۱ معرفی شد. این شاخص پیکسل‌هایی را که نشان‌دهندهٔ مقادیر دامنهٔ پایدار هستند، مطابق رابطه [۱] شناسایی می‌کند. شاخص پراکندگی دامنه بر اساس رابطه زیر بیان می‌شود (فرتی و همکاران، ۲۰۰۱).

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} \qquad [۱]$$

که در آن σ_A و m_A به ترتیب برابر با انحراف معیار و میانگین دامنه باز پراکنش هر پیکسل است. در این مرحله پراکنده سازهای کمتر ولی باقابلیت اطمینان بالا جهت برآورد اتمسفر انتخاب می‌شوند. مقدار بهینه این شاخص ۰/٤ پیشنهادشده است. در این تحقیق مقدار شاخص پراکندگی دامنه (۰/٤۲) انتخاب‌شده است، تا تعداد پراکنده سال‌های

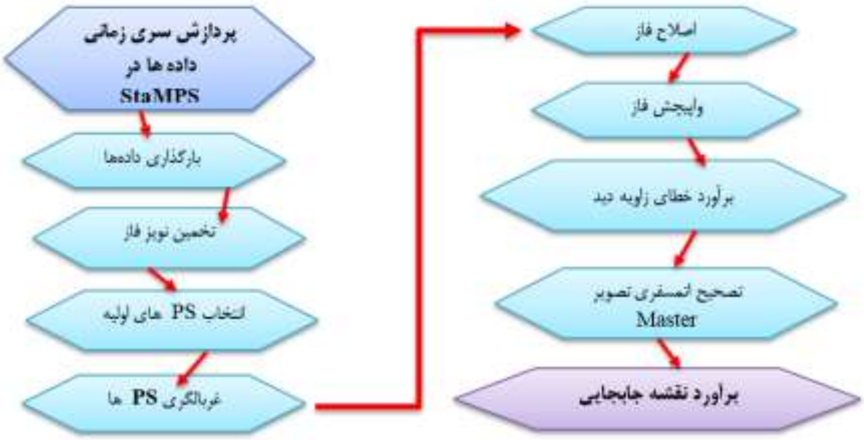
1 Ferretti

دائمی) اولیه را در آغاز پردازش افزایش دهد، این دامنه به صورتی تعیین می‌شود که احتمال انتخاب پراکنش کننده‌های واقعی را افزایش داده و احتمال انتخاب پیکسل‌های با فاز تصادفی کاهش یابد. مرحله بعد از آماده‌سازی داده‌های استمپس، مربوط به واردکردن داده‌های آماده‌شده در اسنپ به استمپس است. پس‌ازآن، زنجیره پردازش پراکنده ساز استمپس (StaMPS-PSI) ایجاد می‌شود (هوپر[1] و همکاران، ۲۰۱۸).

پردازش روش پراکنده ساز دائمی با استفاده از استمپس (StaMPS)

مجموعه‌ای از اینترفروگرام ها با استفاده از روش‌های اجرایی متلب در استمپس پردازش‌شده است، که با تصحیحات تروپوسفریک مبتنی بر فاز خطی با استفاده از پکیج ترین (TRAIN) که تأخیر تروپوسفری را نسبت به توپوگرافی جبران می‌کند، تکمیل گردیده است (بکرت[2] و همکاران، ۲۰۱۵).

مراحل پردازش تصاویر راداری سنتینل–۱ در پکیج استمپس (StaMPS) طبق شکل ٦، شرح داده شده است:



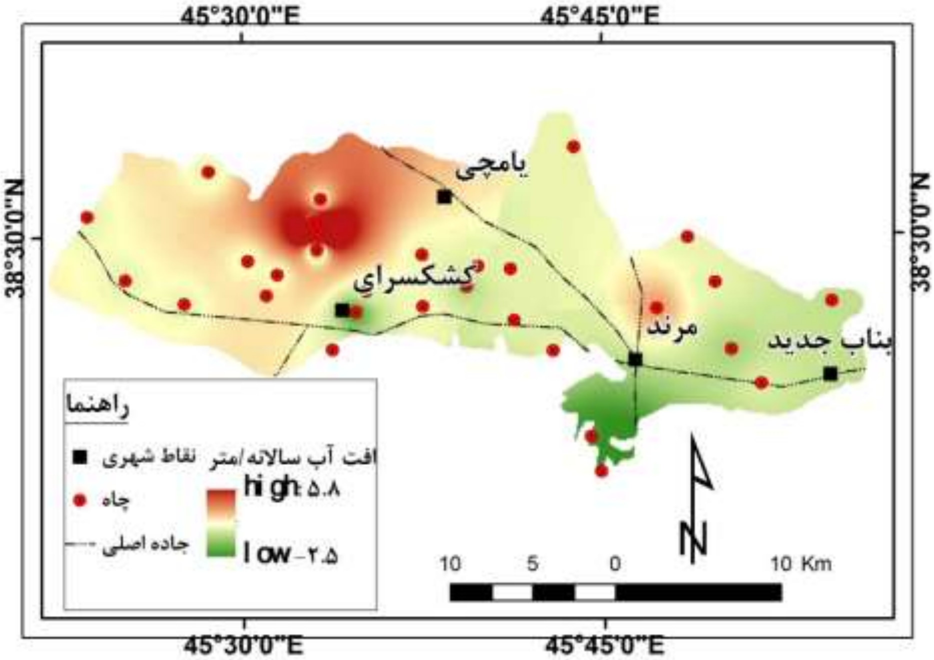
شکل ٦– مراحل پردازش استمپس (StaMPS)

۳- نتایج و بحث

به‌منظور بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی در این محدوده، با استفاده از اطلاعات ثبت‌شده سطح آب زیرزمینی در ۳۰ چاه مشاهداتی که دارای داده‌های کامل بوده است، در بازه زمانی ۱۷ ساله (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷) نقشه هم افت سطح آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی در محیط نرم‌افزار ARC–GIS و از طریق درون‌یابی به روش IDW ترسیم‌شده است (شکل ۷). بر اساس نتایج حاصله، میانگین افت سالانه آب زیرزمینی در منطقه موردمطالعه بین ۵/۸ و ۲/۵– متر طی دوره ۱۷ ساله بوده است که ازنظر پراکنش مکانی، مناطق میانی دارای بالاترین میزان افت بوده‌اند. چاه‌های واقع

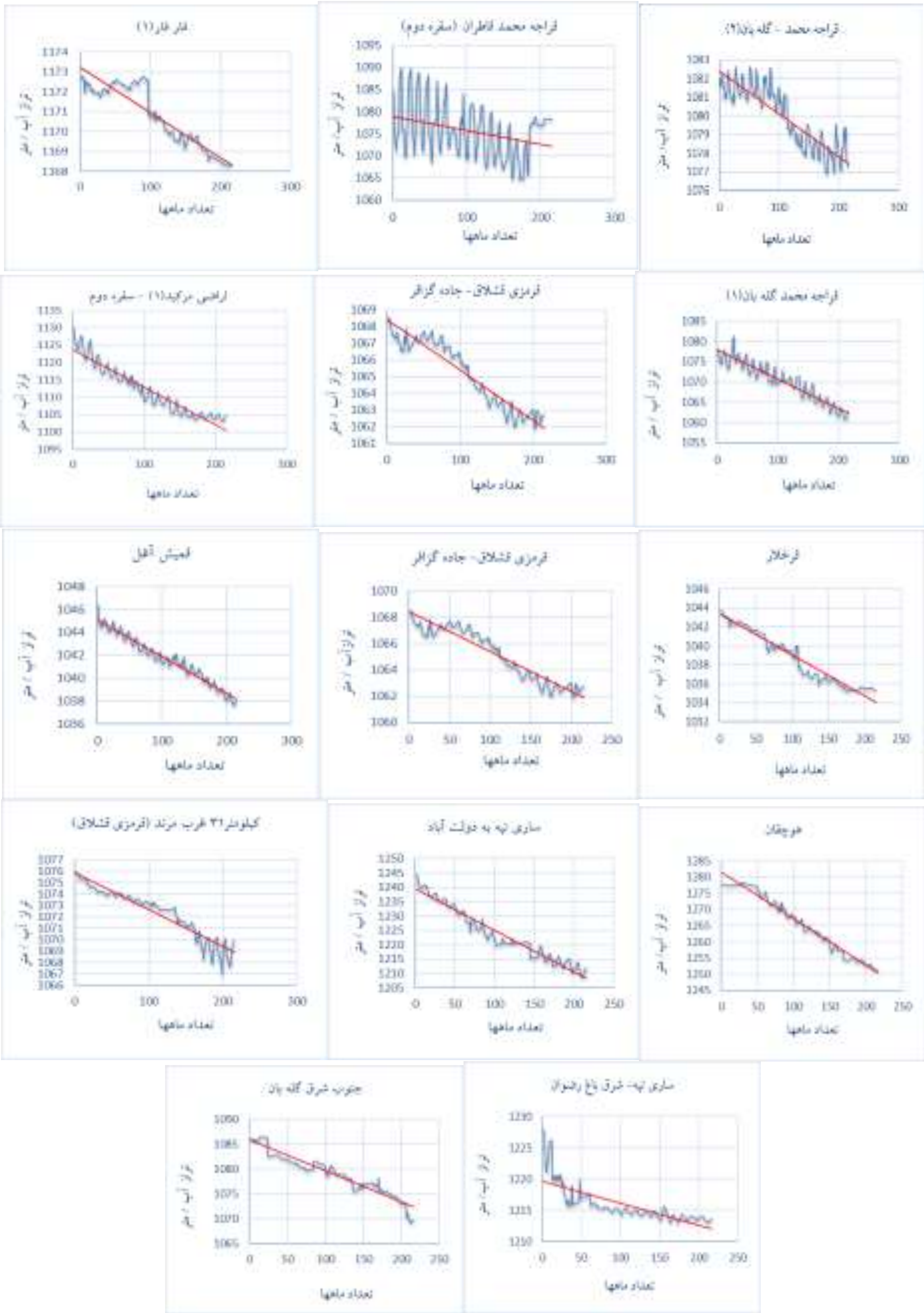
1 Hooper
2 Bekert

در محدوده‌های شمال غرب و جنوب غرب کشک سرای و یامچی دارای بالاترین افت سالانه آب زیرزمینی را داشته است.



شکل ۷- نقشه افت منابع آب زیرزمینی منطقه موردمطالعه

همچنین برای بررسی تغییرات زمانی نوسانات سالانه سطح آب زیرزمینی، از داده‌های ماهانه سطح آب زیرزمینی ۳۰ چاه مشاهده‌ای در طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷ استفاده‌شده است. شکل ۸ هیدروگراف مربوط به تغییرات سری زمانی سطح آب در ۳۰ چاه مشاهده‌ای موجود در دشت مرند را نشان می‌دهد. بررسی هیدروگراف‌های چاه‌های مشاهده‌ای قرارگرفته در آبخوان مرند نشان‌دهنده حالت نوسانی تراز آب چاه‌ها است و تراز آب همواره روند نزولی نسبت به زمان نشان می‌دهد. روند نزولی هیدروگراف ها نشان‌دهنده افت مداوم سطح آب زیرزمینی است. کاهش تغذیه ناشی از خشک‌سالی‌های اخیر به همراه افزایش برداشت بی‌رویه به‌عنوان عامل اصلی افت شدید سطح آب زیرزمینی در دشت مرند شده است.

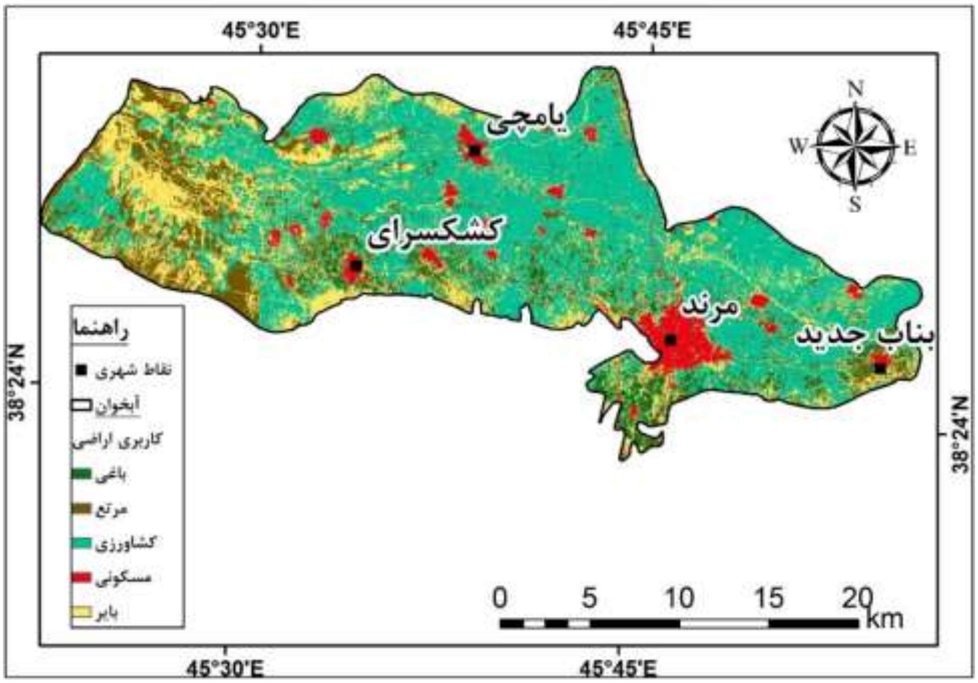


شکل ۸- نمودارهای سری زمانی چاه‌های مشاهداتی دارای افت آب و فرونشست در محدوده مطالعاتی

تحلیل نقشه کاربری و پوشش اراضی و ارتباط آن با فرونشست منطقه

نوع کاربری اراضـی از عوامل انسانی مهم در تشدید وقوع فرونشست است. درواقع، بهره‌برداری‌های انسان یکی از عوامل مؤثر در وقوع فرونشست محسوب می‌شود، به‌طوری‌که مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی آبی به دلیل

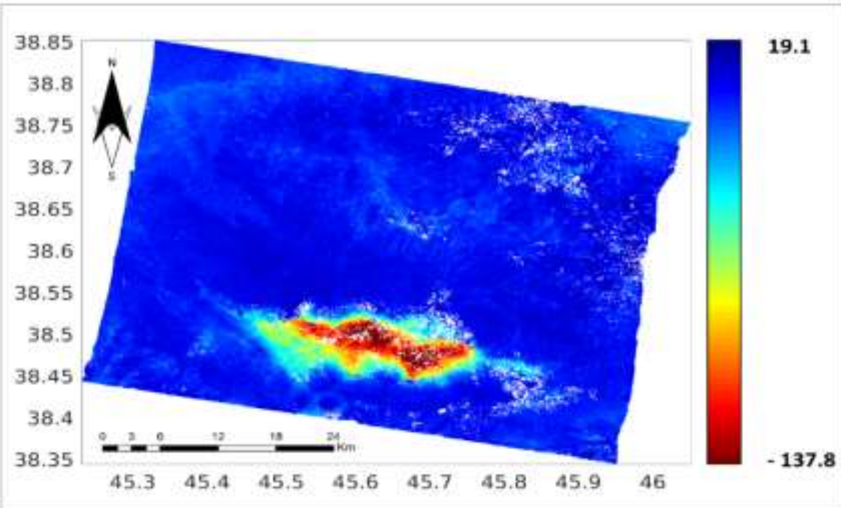
بهره‌برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسیل بالایی جهت وقوع فرونشست دارد. همچنین مناطق سکونتگاهی نیز به دلیل ساخت‌وسازها، مستعد وقوع فرونشست هستند. در این تحقیق، نقشه کاربری اراضی محدوده موردمطالعه از نقشه پوشش اراضی کل جهان که توسط سازمان فضایی اروپا که ۲۰۲۱ ماه اکتبر با رزولوشن ۱۰ متر که بر اساس داده‌های راداری Sentinel-1 و Sentinel-2، در ۱۱ کلاس پوشش زمین تهیه‌شده اخذ گردیده و محدوده مطالعاتی از نقشه کل برش داده شد. پس‌ازاینکه محدوده را از نقشه سازمان ESA، جداسازی شد، نقشه کاربری را در محیط ARC-GIS از طریق ابزار Reclassify به ۵ طبقه، نواحی سکونتگاهی، کشاورزی - باغی، مراتع و اراضی بایر طبقه‌بندی‌شده است (شکل ۹). بر اساس نقشه مذکور، مناطق جنوبی و جنوب غربی محدوده منطبق بر کوهستان میشو را کاربری مراتع و اراضی بایر و همچنین مناطق مرکزی محدوده را اراضی کشاورزی آبی و دیم دربرگرفته است. فرونشست رخ‌داده در این منطقه در کلاس مربوط به اراضی زراعی نزدیک به مناطق سکونتگاهی اتفاق افتاده است. با توجه به این تغییرات، میزان افت آب‌های زیرزمینی و یا میزان افزایش آن را مشخص سازد. مطالعات بیشتری در کل جهان و کاربری‌های مختلف تأثیرات بسیار زیادی بر روی سطح تراز آب‌های زیرزمینی دارند، به این دلیل که کاربری‌های مختلف باعث مصرف متفاوتی از آب‌های زیرزمینی می‌شود.



شکل ۹- نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی

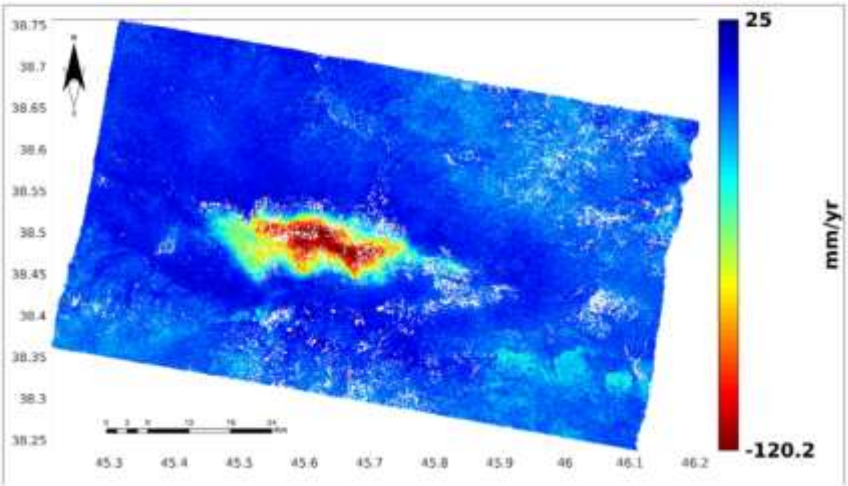
ارزیابی میزان فرونشست با استفاده از روش تداخل سنجی پراکنش گرهای دائمی (PSInSAR)

بررسی وضعیت فرونشست در محدوده موردمطالعه در بازه زمانی ۲۲ ژانویه سال ۲۰۱٦ تا ۲۳ دسامبر سال ۲۰۱٦ نشـان می‌دهد که بیش‌ترین میزان فرونشـست در قسـمت میانی دشت مرند، در قاعده مخروط افکنه های قدیمی و قسـمت دشتی این محدوده، در محدوده روستاهای اربطان، فارفار، مرکید، یالقوزآغاج، گله بان و درویش محمد بوده است. حداکثر فرونشست در سال ۲۰۱٦ با فاصله زمانی ۱۲ روزه، ۱۳۷/۸- میلی‌متر در سال برآورد شد. کمترین میزان جابجایی با مقدار ۱۹/۱ میلی‌متر بالاآمدگی در منطقه موردمطالعه رخداده است (شکل ۱۰).



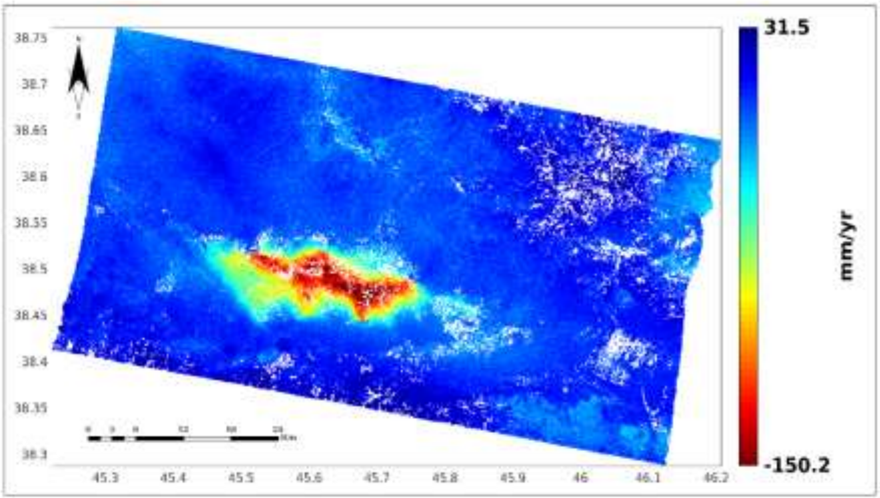
شکل ۱۰- نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۱٦

نقشـه فرونشـسـت سال ۲۰۱۷ حاکی از افزایش نرخ فرونشست در محدوده مطالعاتی است (شکل ۱۱). حداکثر جابجایی زمین در سال ۲۰۱۷ در بازه زمانی ۱۲ روزه، ۱۲۰/۲ - میلی‌متر به‌صورت فرونشست و ۲۵ میلی‌متر به شکل بالاآمدگی بوده اسـت. تغییرات جابجایی زمین در این سـال نسـبت به سـال قبل بدین‌صـورت بوده اسـت که نرخ فرونشست ۱۸ میلی‌متر کاهش و بالاآمدگی منطقه ٦ میلی‌متر افزایش پیداکرده است.



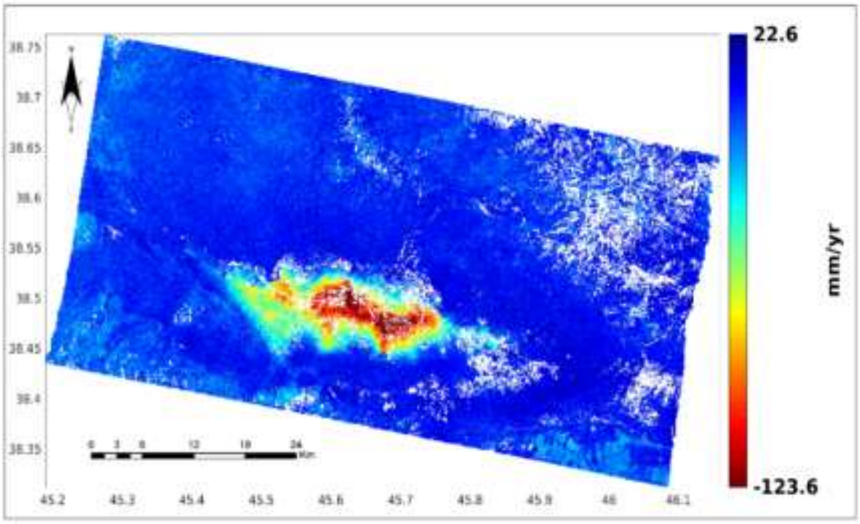
شکل ۱۱- نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۱۷

تاریخ ۱۱ ژانویه ۲۰۱۸ تا ۲۵ دسـامبر ۲۱۰۸، میزان فرونشست منطقه ۳۲ میلی‌متر افزایش‌یافته و به نرخ حداکثری ۱۵۲/۲- میلی‌متر فرونشست و ۳٤/۲ میلی‌متر بالاآمدگی رسیده است (شکل ۱۲).



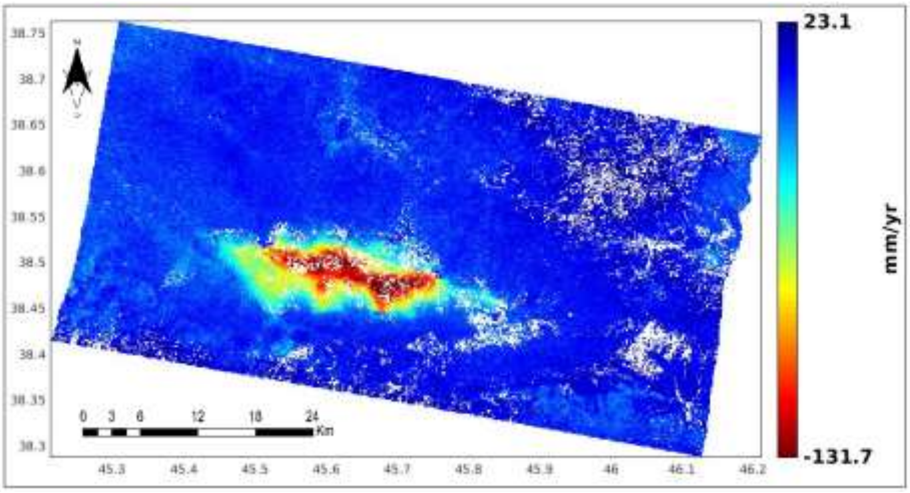
شکل ۱۲- نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۱۸

بررسـی وضـعیت فرونشست در محدوده موردمطالعه از روز ٦ ژانویه سال ۲۰۱۹ تا ۲۰ دسامبر همین سال نشان می‌دهد که نرخ جابجایی به‌صـورت ۱۲۳/٦- میلی‌متر فرونشـــت و ۲۲/٦ میلی‌متر بالاآمدگی به‌دســت‌آمده اســت، وضـعیت فرونشـــت زمین در این محدوده روند افزایشــی ۱۲ میلی‌متر بالاآمدگی و ۲۹ میلی‌متر کاهش فرونشست زمین نسبت به سال قبل را نشان می‌دهد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳-نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۱۹

بررسی وضعیت فرونشست در محدوده موردمطالعه در بازه زمانی روز ۱ ژانویه سال ۲۰۲۰ تا دسامبر سال ۲۰۲۰ نشـان می‌دهد که این مقدار نسـبت به سـال قبل حدود ۹ میلی‌متر کاهش فرونشـست و ۱ میلی‌متر بالاآمدگی افزایش پیداکرده است. در سال ۲۰۲۰، مقدار فرونشست و بالاآمدگی به ترتیب ۱۳۱/۷- میلی‌متر و ۲۳/۱ میلی‌متر به‌دست‌آمده است (شکل ١٤). بیش‌ترین میزان جابجایی رخداده در محدوده مطالعاتی، در سال ۲۰۱۸ اتفاق افتاده است درمجموع مخروط افکنه‌ها خصوصاً قاعده مخروط افکنه‌ها و دشت انتهایی دارای بیش‌ترین مقادیر فرونشست هستند.



شکل ١٤- نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۲۰

٤- جمع‌بندی

روش سـری زمانی تداخل سـنجی با پراکنش گرهای دائمی (PSI)، کمک شـایانی در جهت پایش فرونشست و جابجایی‌های سطح زمین کرده است. ازجمله محدودیت‌های این روش وجود پیکسل‌های سفید زنگ در سطح نقشه جابجایی بود، این موضـوع به دلیل ناهمبسـتگی زمانی که براثر تغییرات سـریع پوشـش منطقه و درنتیجه پایین بودن میزان همدوسـی ایجاد می‌شـود. همچنین اختلاف‌فاز ناشـی از باز کردن فاز (phase unwrapping) که با توجه به توپوگرافی منطقه موردمطالعه قابل‌توجه نبوده اسـت. در تحقیق حاضـر، برای نخسـتین بار به پایش نرخ فرونشـست زمین در دشت مرند استان آذربایجان شرقی، از فن تداخل سنجی راداری PSI با استفاده از داده‌های سنجنده سنتینل–۱ و پکیج خودکار SNAP2STAMPS اسـتفاده‌شـده اسـت. همچنین در این تحقیق، پتانسیل بسته متن‌باز استمپس و نرم‌افزار اسـنپ جهت پردازش تداخل سـنجی راداری نشـان داده‌شـده اسـت که از نتایج مهم اسـتخراج‌شـده از این الگوریتم پردازشـی، ایجاد نقشـه‌های متوسـط جابجایی برای دشـت مرند با مقادیر ۱۳/۷–، ۱۲–، ۱۵/۲–،۱۲/۳ – و ۱۳/۱– سـانتی‌متر در سـال در راسـتای دید ماهواره در طول بازه زمانی موردمطالعه (از سـال ژانویه ۲۰۱٦ تا دسـامبر ۲۰۲۰) بوده است. فرونشست‌های رخ‌داده در منطقه بر زیرساخت‌های موجود تأثیر گذاشته و باعث شکست پایه بتنی چاه‌های کشاورزی و خم شدن تیرهای برق گردیده است. به لحاظ پراکنش مکانی، مناطق فرونشست یافته عمدتاً در مناطق میانی دشت مشـاهده‌شـده است؛ بنابراین مناطق میانی دشـت بیشـترین نرخ فرونشست نسبت به سایر نواحی دشـت را دارا هسـتند. منطقه فرونشـست در جنوب شهر یامچی و شمال و شمال غرب کشک سرای در حال اتفاق افتادن اسـت و روسـتاهای زیادی ازجمله اربطان، فارفار، مرکید ایلات یالقوزآغاج، درویش محمد در آن واقع‌شده در این کاسـه فرونشـسـت قرار دارد که منطبق بر کاربری اراضی کشاورزی و باغی است که به سمت مناطق شهری در حال پیشروی است. بررسی هیدروگراف‌های چاه‌های مشاهده‌ای قرارگرفته در آبخوان مرند نشان‌دهنده حالت نوسانی تراز آب چاه‌ها اسـت و تراز آب همواره روند نزولی نسـبت به زمان نشـان می‌دهد، که نشان‌دهنده افت مداوم سطح آب زیرزمینی است. فرونشست‌های رخ‌داده در دشت مرند بیشتر منطبق بر زمین‌های کشاورزی بوده و سرعت بالایی دارد.

کتابنامه

احمدی، سلمان؛ سودمند افشار، رضا؛ ۱۳۹۹. پایش فرونشست دشت‌های قروه و چهاردولی استان‌های همدان و کردستان به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی با استفاده از فن پراکنش گرهای دائمی. *محیط‌زیست و مهندسی آب*. دوره ٦. شماره ۳. صص ۲۳۳-۲۱۹.

پاپی، رامین؛ عطارچی، سارا؛ سلیمانی، مسعود؛ ۱۳۹۹. تحلیل سری زمانی فرونشست زمین در غرب استان تهران (دشت شهریار) و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی با تکنیک تداخل سنجی راداری. *جغرافیا و پایداری محیط (پژوهشنامه جغرافیایی)*. دوره ۱۰. شماره ۳۳. صص ۱۲۸-۱۰۹.

خرمی، محمد؛ ۱۳۹٦. *تخمین فرونشست مشهد با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و ارزیابی آن با توجه به مشخصات ژئوتکنیکی*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه فردوسی. دانشکده مهندسی.گروه مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک. مشهد. صص ۱٤۰.

خوش‌لهجه آذر، مهدی؛ ۱۳۹۸. *بررسی رفتار فرونشست زمین در مناطق مستعد فروچاله با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی. دانشکده مهندسی نقشه‌برداری (ژئودزی و ژئوماتیک). صص ۱۲۰.

داداشی، ثریا؛ صادق فام، سینا؛ ندیری، عطاالله؛ محبی، یوسف؛ ۱۳۹۹. تحلیل آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان دشت مرند با استفاده از روش ALPRIFT براثر بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمین. *مهندسی عمران*. دوره ۲,۳٦. شماره ۱,۳. صص ۹٦-۸۵.

شرافت، متین؛ انصاری، عبدالحمید؛ مجتهد زاده، سید حسین؛ قربانی، احمد؛ ۱۳۹۹. پایش فرونشست دشت ابرکوه یزد با استفاده از فن تداخل سنجی راداری مبنی بر پراکنش گرهای پایا. خشک *بوم*. دوره ۹. شماره ۲. صص ۱۲۱-۱۳٦.

شمشکی، امیر؛ انتظام سلطانی، ایمان؛ بلورچی، محمدجواد؛ ۱۳۸٤. *فرونشست زمین در دشت تهران و عوامل مؤثر در شکل گیری آن*. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ص ۲۱.

علی بخشی، حمید؛ ۱۳۹۵. *بررسی میزان فرونشست دشت ورامین با استفاده از ابزارهای ژئودتیکی داده‌های ترازیابی دقیق InSAR و تصاویر راداری GPS*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد اسلامی. واحد شاهرود. دانشکده فنی و مهندسی گروه عمران. گروه ژئودزی. ص ۱۳۱.

فروغ نیا، فاطمه؛ نعمتی، صادق؛ مقصودی، یاسر؛ ۱۳۹۷. آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائم. با استفاده از تصاویر Sentinel-1A و ENVISAT-ASAR برای برآورد پدیده فرونشست شهر تهران. *سنجش‌ازدور و GIS ایران*. سال ۱۰. شماره ۱. صص ۵۵-۷۲.

قره چلو، سعید؛ اکبری قوچانی، حسام؛ گلیان، سعید؛ گنجی، کامران؛ ۱٤۰۰. ارزیابی میزان فرونشست زمین در ارتباط با آب‌های زیرزمینی به کمک داده ماهواره‌ای راداری سنتینل-۱ و الوس-۱ (منطقه موردمطالعه: دشت مشهد). *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*. دوره ۱۲. شماره ۳. صص ٦۱-٤۰.

مختاری کشکی، داود؛ ۱۳۸٦. تحلیل‌های زمین‌ساخت - رسوبی چاله تکتونیکی و در حال گسترش مرند. *پژوهش‌های جغرافیایی*. دوره ۳۹. شماره ٦۰. صص ۱٤۹-۱۲۹.

مؤمنی، سحر؛ ۱۳۹۷. *برآورد فرونشست زمین ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی با استفاده از داده‌های سری زمانی (محدوده موردمطالعه: دشت کبودرآهنگ- فامنین همدان)*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی. گروه سنجش‌ازدور. دانشگاه تبریز. ص ۷۱.

Bagheri, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., & Ashrafi, S., 2021. Land subsidence: A global challenge. Science of The Total Environment, 146193. 10.1016/j.scitotenv.2021.146193

Bekaert, D. P. S., Walters, R. J., Wright, T. J., Hooper, A. J., & Parker, D. J., 2015. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. Remote Sensing of Environment, 170, 40-47. 10.1016/j.rse.2015.08.035.

Cian, F., Blasco, J. M. D., & Carrera, L., 2019. Sentinel-1 for monitoring land subsidence of coastal cities in Africa using PSInSAR: a methodology based on the integration of SNAP and StaMPS. *Geosciences*, *9*(3), 124. 10.3390/geosciences9030124.

Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., & Crippa, B., 2016. Persistent scatterer interferometry: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 78-89. 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.

Da Lio, C., Teatini, P., Strozzi, T., & Tosi, L., 2018. Understanding land subsidence in salt marshes of the Venice Lagoon from SAR Interferometry and ground-based investigations. *Remote sensing of environment*, 205, 56-70. 10.1016/j.rse.2017.11.016.

Delgado Blasco, J. M., Foumelis, M., Stewart, C., & Hooper, A., 2019. Measuring urban subsidence in the Rome metropolitan area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS persistent scatterer interferometry. Remote Sensing, 11(2), 129. 10.3390/rs11020129.

El Kamali, M., Papoutsis, I., Loupasakis, C., Abuelgasim, A., Omari, K., & Kontoes, C., 2021. Monitoring of land surface subsidence using persistent scatterer interferometry techniques and ground truth data in arid and semi-arid regions, the case of Remah, UAE. Science of The Total Environment, 776, 145946. 10.1016/j.scitotenv.2021.145946.

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 39(1), 8-20. 10.1109/36.898661.

Fiaschi, S., Holohan, E. P., Sheehy, M., & Floris, M., 2019. PS-InSAR analysis of Sentinel-1 data for detecting ground motion in temperate oceanic climate zones: a case study in the Republic of Ireland. *Remote Sensing*, 11(3), 348. 10.3390/rs11030348.

Foumelis, M., Blasco, J. M. D., Desnos, Y. L., Engdahl, M., Fernández, D., Veci, L., ... & Wong, C., 2018. ESA SNAP-StaMPS integrated processing for Sentinel-1 persistent scatterer interferometry. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1364-1367). IEEE. https://forum.step.esa.int.

Haghighi, M. H., & Motagh, M., 2019. Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote sensing of environment*, *221*, 534-550. 10.1016/j.rse.2018.11.003.

Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., ... & Ye, S., 2021. Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, *371*(6524), 34-36. 10.1126/science.abb8549.

Hooper, A., Bekaert, D., Ekbal, H., & Spaans, K., 2018. StaMPS/MTI manual: Version 4.1 b. School of Earth and Environment, University of Leeds. Retrieved October, 15, 2019. https://homepages.see.leeds.ac.uk.

Liosis, N., Marpu, P. R., Pavlopoulos, K., & Ouarda, T. B., 2018. Ground subsidence monitoring with SAR interferometry techniques in the rural area of Al Wagan, UAE. *Remote Sensing of Environment*, *216*, 276-288. 10.1016/j.rse.2018.07.001.

Maghsoudi, Y., van der Meer, F., Hecker, C., Perissin, D., & Saepuloh, A., 2018. Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia. International journal of applied earth observation and geoinformation, 64, 386-396. 10.1016/j.jag.2017.04.001.

Mateos, R. M., Ezquerro, P., Luque-Espinar, J. A., Béjar-Pizarro, M., Notti, D., Azañón, J. M., ... & Jiménez, J., 2017. Multiband PSInSAR and long-period monitoring of land subsidence in a strategic detrital aquifer (Vega de Granada, SE Spain): An approach to support management decisions. Journal of Hydrology, 553, 71-87. 10.1016/j.jhydrol.2017.07.056.

Miller, M. M., & Shirzaei, M., 2019. Land subsidence in Houston correlated with flooding from Hurricane Harvey. *Remote Sensing of Environment*, *225*, 368-378. 10.1016/j.rse.2019.03.022.

Sun, H., Zhang, Q., Zhao, C., Yang, C., Sun, Q., & Chen, W., 2017. Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique. *Remote sensing of environment*, *188*, 73-84. 10.1016/j.rse.2016.10.037.

Zuo, J., Gong, H., Chen, B., Liu, K., Zhou, C., & Ke, Y., 2019. Time-series evolution patterns of land subsidence in the eastern Beijing Plain, China. *Remote Sensing*, *11*(5), 539. 10.3390/rs11050539.